Recommandation du SETRA et du LCPC pour le traitement en place des sols fins à la chaux

Présentation

E. LEFLAIVE
Ingénieur ECP
Chef de la section de géotechnique routière
et terrassements
Laboratoire central

LE traitement des sols à la chaux, en tant que technique de terrassement, est actuellement en France dans une phase de développement, à la suite du démarrage qu'il a connu dans le nord du pays il y a quelques années.

Ce développement a plusieurs causes. En premier lieu, le volume des travaux de terrassement, d'une manière générale, est de plus en plus important et l'on souhaite, pour ces travaux, une planification toujours plus précise et plus sûre qui s'accommode mal des aléas des terrassements dans les sols sensibles à l'eau ; en second lieu, la mise en dépôt des sols fins et leur remplacement par des matériaux d'emprunt est une solution de plus en plus coûteuse dans les régions où les matériaux d'emprunt se raréfient ; enfin, la gamme des matériels d'exécution bien adaptés au traitement à la chaux s'est développée au cours de ces dernières années et continue à se compléter.

Ces différents éléments ont entraîné une prise de conscience de l'intérêt de cette technique. L'expérience des premiers chantiers importants, les constatations et études de laboratoire qu'ils ont suscitées, jointes à une analyse de l'expérience et des connaissances déjà acquises à l'étranger, notamment en République fédérale d'Allemagne, en Suisse, en Belgique et aux Etats-Unis, ont permis de dégager les notions les plus importantes et les principales règles à suivre pour un bon emploi de cette technique. Ces notions et ces règles font l'objet de la Recommandation pour le traitement en place des sols fins à la chaux appliqué aux travaux de terrassement (*).

Sans chercher à résumer le contenu de ce document, quelques points sont à souligner.

* Cette Recommandation, élaborée conjointement par le SETRA et le LCPC, a été diffusée dans les services de l'Equipement. Elle peut être obtenue en s'adressant :
— au SETRA, Division des chaussées, 46, avenue Aristide-Briand — 92223 BAGNEUX,
— au LCPC, Service des publications, 58, boulevard Lefebvre — 75732 PARIS CEDEX 15.

Tout d'abord, bien que l'on sache que la chaux a un effet bénéfique à long terme sur le comportement mécanique des sols argileux, l'effet principal utilisé dans l'emploi du traitement à la chaux en terrassement est l'action immédiate de la chaux sur la consistance de la plupart des sols contenant une fraction argileuse. Cette action se mesure par l'augmentation de l'indice CBR obtenue à court terme par l'incorporation de chaux.

Pour les sols fins réagissant bien avec la chaux, et qui sont très nombreux, l'essentiel de l'action immédiate de la chaux est obtenu avec des dosages inférieurs à 2 % en poids, et même souvent inférieurs à 1 %. Ce point est évidemment capital sur le plan économique.

D'autre part, comme toute technique, le traitement à la chaux demande un matériel approprié ; il existe des engins récents très bien adaptés à certaines phases du traitement ; il sera très utile que l'ensemble de la gamme des matériels continue à s'améliorer, à la fois pour une meilleure qualité, une meilleure économie et une meilleure sécurité de l'exécution dans toutes ses phases, et pour l'extension de cette technique à un plus large éventail de sols, comprenant notamment les sols très cohérents et les sols contenant de gros éléments.

Un dernier point à mentionner au sujet de la technique du traitement est celui du choix de la chaux. Mis à part les problèmes de sécurité qu'elle pose dans l'état actuel de la technique, la chaux vive présente des avantages qui la font préférer à la chaux éteinte ; l'emploi de cette dernière est cependant intéressant également. Quant aux caractéristiques de la chaux, vive ou éteinte, la Recommandation donne des indications, sans que ces dernières soient considérées comme impératives, à la fois en raison des possibilités actuelles de fourniture et parce qu'en définitive la décision découle de l'examen du bilan technico-économique qui peut être fait, dans chaque cas, sur la base des essais de laboratoire et de chantier et du prix de revient des chaux dont l'emploi peut être envisagé.

Il faut souhaiter que cette Recommandation, telle qu'elle a pu être rédigée, compte tenu des connaissances actuelles, soit à l'origine de l'extension, dans de bonnes conditions techniques, du traitement à la chaux, qui a déjà dans notre pays une place importante puisque plusieurs millions de mètres cubes de sols fins ont été traités à ce jour. Mais on peut envisager un développement encore beaucoup plus important de cette technique si l'on considère qu'elle n'a encore intéressé que quelques régions de France et si l'on considère également, à titre de comparaison, que les volumes traités par nos voisins belges, au cours des quatre ou cinq dernières années, sont égaux à plusieurs fois les volumes traités en France.

MINISTÈRE DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE,
DE L'ÉQUIPEMENT, DU LOGEMENT ET DU TOURISME

SERVICES D'ÉTUDES TECHNIQUES DES ROUTES ET AUTOROUTES (SETRA)

LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES (LCPC)

Recommandation pour le traitement en place des sols fins à la chaux

Ce document est propriété de l'Administration et ne peut être reproduit même partiellement, sans l'autorisation du Directeur du Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes ou du Directeur du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (ou de leurs représentants autorisés).

MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT
ET DU LOGEMENT

**SERVICE D'ÉTUDES TECHNIQUES
DES ROUTES ET AUTOROUTES**

M. HUET

Ingénieur Général des Ponts et Chaussées

Directeur

Bagneux, le 29 juin 1972
46, av. Aristide-Briand - 92223 BAGNEUX
Tél. : 655-42-42

Le Directeur du Service d'Etudes Techniques
des Routes et Autoroutes
à
Monsieur le Directeur Départemental
de l'Equipement

OBJET : Traitement des sols fins à la chaux.

Le traitement des sols en place connaît actuellement un certain développement en France dans les travaux de terrassement. En particulier, le traitement des sols fins à la chaux est un procédé qui permet d'utiliser en remblai certains sols limoneux ou argileux, qui seraient mis à la décharge en raison de leur état, et peut ainsi constituer, une solution aux problèmes des terrassements dans les régions défavorisées du point de vue des matériaux. Le traitement à la chaux permet également de constituer, avec des sols médiocres, des couches de forme ayant des caractéristiques suffisantes pour une mise en œuvre correcte des chaussées. Il peut dans ce cas également être utilisé en phase préliminaire à un traitement au ciment.

Les présentes recommandations ont pour objet d'aider les maîtres d'œuvre à réaliser de tels traitements, en les informant des résultats des recherches et expérimentations effectuées au cours de ces dernières années.

La poursuite des études entreprises et des constatations sur chantier permettra d'améliorer nos connaissances et d'élaborer ultérieurement des directives plus précises. Il est donc important que vous fassiez part, soit au SETRA, Division des chaussées et des terrassements, soit au LCPC, Département de géotechnique, des difficultés que vous pourriez éventuellement rencontrer dans l'emploi de cette technique.

J'attire tout particulièrement votre attention sur les points suivants :

— Le traitement des sols à la chaux est une technique particulière de terrassement qui présente des avantages certains dans les régions défavorisées du point de vue de la qualité du sol et des conditions climatiques. Elle donne en particulier une grande souplesse dans le déroulement du chantier, en réduisant les arrêts dus aux intempéries et en améliorant les conditions de travail des sols. Elle permet également d'obtenir une meilleure qualité globale des terrassements, notamment par l'homogénéité du matériau traité.

Cependant, compte tenu du coût relativement élevé du traitement à la chaux, son emploi doit résulter d'une étude économique comparant les différentes solutions susceptibles d'être envisagées.

— Le traitement à la chaux permet d'obtenir des couches de forme *ayant des caractéristiques suffisantes pour construire les chaussées, mais il ne permet pas de supprimer tous les problèmes de chantier. En particulier, la stabilité à l'eau et au gel n'est pas totale et de telles couches de forme ne peuvent recevoir sans aucune dégradation une circulation très lourde du chantier en période pluvieuse ou au moment du dégel. Ces dégradations restent généralement superficielles et sont alors réparables.*

L'évolution favorable à long terme des caractéristiques obtenues pour les couches de forme traitées à la chaux, permettra vraisemblablement d'en tenir compte dans le dimensionnement des chaussées et de modifier en conséquence la classe du sol de fondation. Les applications de cette technique sont encore trop récentes pour qu'on puisse en tirer des conclusions et modifier les dispositions fixées au Catalogue de structures types de chaussées.

Il apparaît néanmoins possible de prendre en compte les couches de forme traitées à la chaux, dans l'épaisseur totale des matériaux considérés comme non gélifs dans le processus de dimensionnement des chaussées vis-à-vis du gel, fixé au Catalogue des structures, sauf lorsque les conditions locales sont très sèvères (gel profond, plusieurs cycles de gel-dégel et très forte humidité sous le sol traité.).

D'autres techniques de construction de couches de forme peuvent être employées, comme par exemple le traitement au ciment lorsque les sols ont des teneurs en eau peu élevées ou le traitement mixte chaux-ciment.

Le choix d'une couche de forme (traitée ou non) et les fonctions qu'elle doit assurer avant, pendant et après la construction de la chaussée, dépendent de la nature du sol en place, des conditions locales (climat, ressources en matériaux, contraintes de circulation pour les approvisionnements, etc.) et de la structure de la chaussée prévue. Il doit résulter d'une étude économique comparant différentes solutions pour l'ensemble couche de forme et chaussée.

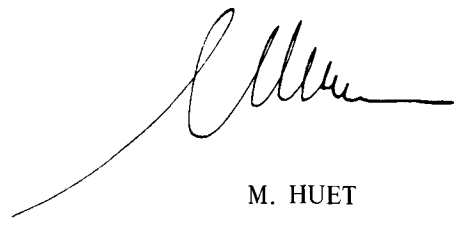
— Le prix de la chaux est un élément important du coût du traitement. Il est actuellement de l'ordre de 2 à 3 francs par mètre cube et par pour-cent de chaux utilisée. Il est donc important de limiter le dosage en chaux à la quantité strictement nécessaire, compte tenu des caractéristiques des sols et de l'objectif visé. Le dosage économique ne peut être déterminé sans étude préalable et sans contrôle sur chantier. Certains sols peuvent être traités avec des dosages très faibles (inférieurs à 1 % en laboratoire).

En pratique, le dosage sur chantier est plus élevé, les matériels existants actuellement ne permettant pas une grande précision du dosage. Un effort a été entrepris pour améliorer ces matériels et a permis la mise au point d'un appareil au Centre d'études et de construction de prototypes de Rouen, dont la construction et la commercialisation sont à l'étude.

Cet effort doit être maintenu, en particulier par une exigence soutenue des maîtres d'œuvre sur les caractéristiques et l'état des matériels utilisés sur les chantiers (vérification et contrôle de la dispersion avant agrément).

Un Cahier des prescriptions spéciales types précisant les clauses particulières au traitement des sols à la chaux, est en préparation et vous sera adressé ultérieurement.

Le Directeur du Service d'Etudes Techniques
des Routes et Autoroutes.



M. HUET

SOMMAIRE

INTRODUCTION

A - Objet du traitement à la chaux

B - Mécanisme de la stabilisation

CHAPITRE 1

Les différents matériaux en présence - Leurs caractéristiques

1.1 - Les différents types de sols passibles d'un traitement à la chaux

1.2 - Les critères de choix de la chaux

CHAPITRE 2

Les études

2.1 - Etude au niveau de l'ensemble du projet

2.2 - Etude en laboratoire

2.3 - Planche d'essais

2.4 - Approvisionnement en chaux

CHAPITRE 3

Recommandations sur la mise en œuvre
Spécifications et contrôles

3.1 - Sécurité

3.2 - Organisation du chantier dans le cadre du mouvement des terres

3.3 - Préparation du sol

3.4 - Approvisionnement, stockage et contrôle de la qualité de la chaux

3.5 - Dosage et épandage de la chaux

3.6 - Epaisseur des couches au malaxage et au compactage

3.7 - Malaxage

3.8 - Compactage

3.9 - Réglage des couches et des surfaces de talus

ANNEXE I

Les diverses qualités de chaux disponibles

ANNEXE II

Schéma d'étude en laboratoire

ANNEXE III

Indications sommaires sur les matériels de traitement en place

Les présentes recommandations concernent le traitement à la chaux de sols limoneux ou argileux effectué en place et qui est destiné à les rendre aptes à être mis en œuvre et à constituer un remblai ou une couche de forme.

Remarque préliminaire : *Des chaux de natures et de propriétés différentes sont susceptibles d'être utilisées. Actuellement, et dans l'état de nos connaissances, seule l'utilisation des « chaux aériennes » peut faire l'objet de recommandations et de prescriptions* (*).

INTRODUCTION

A - OBJET DU TRAITEMENT A LA CHAUX

Certains sols, limoneux ou argileux, en raison de leurs propriétés géotechniques intrinsèques et (ou) de leur teneur en eau sont considérés comme des matériaux mauvais ou médiocres, créant un handicap économique et technique pour le maître d'œuvre et pour l'entreprise. Le plus souvent, ces sols sont mis en dépôt et remplacés par d'autres de meilleure qualité.

Le traitement à la chaux peut apporter une solution aux problèmes posés par ces sols, à la fois en modifiant leur nature et en améliorant leur état. Il permet d'utiliser des sols impropres au réemploi ou de qualité médiocre dans leur état naturel, et d'exécuter les terrassements dans des conditions normales de travail tout en diminuant la susceptibilité du chantier aux intempéries, pour :

— exécuter des remblais en masse tout en améliorant leur stabilité, réaliser des pistes de chantier, éventuellement améliorer localement des zones de terrain très humides ;

— constituer des couches de forme ayant des qualités mécaniques suffisantes pour recevoir le trafic de chantier, la chaussée et le trafic futur, et ayant une stabilité à l'eau et au gel améliorée. Le traitement à la chaux peut, dans ce cas, constituer un traitement en soi ou un traitement préliminaire à un traitement au ciment.

B - MECANISME DE LA STABILISATION

Ce mécanisme peut se décomposer en actions élémentaires, dues pour les unes aux réactions chimiques et, pour les autres, aux procédés de mise en œuvre du mélange. Chacune de ces actions pourrait être considérée comme indépendante des autres. Il y a cependant souvent superposition de plusieurs d'entre elles, selon le type de chaux utilisé (vive ou hydratée) et les conditions de mise en œuvre.

Les propriétés du sol traité évoluent plus ou moins vite dans le temps.

B. 1 — MODIFICATION DE LA TENEUR EN EAU

La teneur en eau d'un mélange sol + chaux est inférieure à celle du sol initial, en raison de :

— l'hydratation de la chaux (si elle est vive), est une réaction immédiate et fortement exothermique, ce qui a pour effet d'élever la température du mélange : $CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + 15{,}5$ kcal

— l'évaporation de l'eau : deux phénomènes interviennent simultanément, lors du mélange, d'une part, la contribution d'une partie de la chaleur de réaction à la vaporisation d'une certaine quantité d'eau du sol, d'autre part, l'aération du sol provoquée par le malaxage du mélange.

La part de l'évaporation, due au premier phénomène, a une limite supérieure. Celle due au second est très variable en fonction des conditions de malaxage (procédé, durée et énergie de malaxage, hygrométrie, température, vent) ; elle peut être importante ;

— l'apport de matériaux secs : l'apport de chaux sans augmentation de la quantité totale d'eau, diminue la teneur en eau pondérale du mélange.

L'hydratation de la chaux vive, l'évaporation due à la chaleur de réaction et l'apport de matériaux secs produisent ensemble un abaissement de 0,6 à 0,8 % de teneur en eau pour 1 % de chaux. La part la plus importante de cet abaissement peut souvent être mise sur le compte du malaxage ; en effet, si les conditions atmosphériques sont favorables, elle peut atteindre plusieurs fois celle due au seul apport de chaux vive.

* On trouvera en annexe I un exposé sommaire sur les diverses chaux existantes et leurs propriétés.

B. 2 — MODIFICATION DES PROPRIETES GEOTECHNIQUES DU SOL

Cette modification se fait en deux étapes : l'une immédiate, l'autre, plus lente, peut durer plusieurs années. Elle est due à la réaction de la chaux sur les particules d'argile.

L'ampleur des effets immédiats et à long terme caractérise la réactivité du sol à la chaux ; elle dépend de l'importance de la fraction argileuse contenue dans le sol et de sa nature.

B. 2. 1 — Modifications immédiates

Elles sont dues aux réactions provoquées par l'apport d'ions Ca^{++} et OH^{-} : échange de cations Na^{+} et K^{+} par Ca^{++} et effet de floculation des particules argileuses, provoqué par les forces électriques mises en jeu par cet échange.

L'incidence de ces réactions sur les propriétés géotechniques sont les suivantes :

— la limite de plasticité w_P augmente

— l'indice de plasticité $I_P = w_L - w_P$ diminue

— l'indice CBR augmente

— les courbes Proctor sont, en général, très aplaties

— la teneur en eau à l'optimum Proctor augmente (quand la forme de la courbe en permet la détermination)

— la densité à l'optimum Proctor diminue

— la sensibilité au gel diminue.

Ces modifications immédiates se traduisent notamment par la formation au malaxage de grumeaux non collants qui rendent le sol beaucoup plus maniable. Pour les sols qui réagissent le mieux avec la chaux, l'apparition de ces grumeaux et la maniabilité qui en résulte, ainsi que l'accroissement de l'indice CBR immédiat, se produisent pour des dosages très faibles.

Par exemple, ces effets ont été constatés en laboratoire avec 0,5 % de chaux sur un limon dont la teneur en eau naturelle dépassait très sensiblement la teneur en eau à l'optimum Proctor normal (*).

B. 2. 2 — Modifications à long terme

L'argile et la chaux qui sont en présence vont réagir lentement l'une sur l'autre, en créant de nouvelles espèces minérales dans le sol, qui constituent des ciments de qualités diverses selon la nature minéralogique de l'argile, liant entre elles les particules inertes du sol.

La chaux agit essentiellement sur la silice et l'alumine de l'argile, pour former des silicates et des aluminates de calcium hydratés plus ou moins cristallisés.

Ces modifications dans la nature des particules du sol ont pour effet de faire évoluer encore favorablement les propriétés géotechniques du matériau sol + chaux, et particulièrement la résistance à la compression simple, l'indice CBR, la stabilité à l'immersion et la stabilité au gel.

Remarques sur les paragraphes A et B

Le traitement à la chaux est envisagé ici comme une technique particulière de terrassement en masse et de réalisation de plate-forme de travail, permettant une mise en œuvre correcte des couches de chaussée.

L'évolution favorable à long terme des caractéristiques des couches de forme traitées à la chaux, permettra vraisemblablement d'en tenir compte dans le dimensionnement des chaussées, mais il n'est pas encore possible, dans l'état actuel de nos connaissances, d'envisager une réduction de l'épaisseur de la chaussée proprement dite (**). Pour la même raison, l'utilisation de cette technique pour constituer des couches de fondation de chaussée, n'est pas envisagée dans ce document.

En ce qui concerne la stabilité au gel, des expérimentations effectuées récemment permettent de considérer qu'une couche de forme traitée à la chaux est constituée d'un matériau insensible au gel, à partir du moment où elle est protégée par la chaussée (***), et peut donc être prise en compte dans l'épaisseur des couches non gélives,

— sauf si les conditions sont très sévères (hivers comportant fréquemment plusieurs cycles successifs de gel profond-dégel et très forte humidité sous le limon traité),

— et à condition de réduire l'épaisseur de 10 cm pour tenir compte des irrégularités de la couche dues au réglage.

---

* On est conduit, en pratique, à utiliser sur chantier des dosages minimaux supérieurs, compte tenu de la précision des matériels d'épandage disponibles actuellement. On trouvera en annexe III un exposé sur ces matériels.

** Voir à ce sujet le Catalogue de structures types de chaussées. Ce Catalogue est diffusé par le SETRA, Division des chaussées, et par le LCPC, Service des publications.

*** En ce qui concerne la sensibilité d'une couche de forme non recouverte par la chaussée, voir le paragraphe 3.9.

CHAPITRE 1

LES DIFFÉRENTS MATÉRIAUX EN PRÉSENCE LEURS CARACTÉRISTIQUES

1.1 — LES DIFFERENTS TYPES DE SOLS PASSIBLES D'UN TRAITEMENT A LA CHAUX

L'éventail des sols passibles d'un traitement à la chaux efficace est large, mais il dépend, d'une part, de la nature des sols et, d'autre part, des possibilités pratiques des engins de mise en œuvre, qui limitent l'intérêt économique de la solution.

— Les sols doivent contenir une phase argileuse non négligeable, puisque c'est à partir d'elle que se produiront les réactions améliorant les propriétés du sol à court et à long terme. Ce n'est pas le cas de tous les sols réputés difficiles à mettre en œuvre. La possibilité d'utiliser des dosages faibles, donc économiques, implique que le sol réagisse bien avec la chaux (modification des propriétés géotechniques définies au paragraphe B.2) et que sa teneur en eau reste dans certaines limites.

Cependant, si un sol réagit mal avec la chaux, le traitement peut être utilisé avec le seul objectif de réduire la teneur en eau, mais l'amélioration obtenue est alors temporaire et le traitement peut nécessiter des dosages importants qui en limitent l'emploi.

Il faut aussi noter que la présence de matières organiques n'est pas favorable à l'effet de la chaux, surtout à long terme. L'augmentation du dosage qu'elles peuvent entraîner sera donnée par l'étude de laboratoire.

De toute façon, l'aptitude d'un sol au traitement à la chaux ne peut être précisée que par les résultats d'une étude spécifique (voir chapitre 2).

— Il faut tenir compte des possibilités et de l'efficacité des engins adaptés au traitement des sols, qui sont disponibles actuellement (Annexe III). Des difficultés de circulation peuvent se présenter en terrain mou ; des problèmes de malaxage peuvent apparaître pour les sols contenant des cailloux et pour les sols très collants ou très consistants.

1.2 — LES CRITERES DE CHOIX DE LA CHAUX

On peut utiliser soit de la chaux vive soit de la chaux éteinte (Annexes I et II). La chaux vive pose des problèmes de sécurité lors des différentes manipulations (transport et mise en œuvre) ; en revanche, elle présente plusieurs avantages sur la chaux éteinte :

— l'abaissement de teneur en eau obtenu est supérieur,

— à poids égal, elle est plus efficace car elle fournit plus d'ions Ca^{++} (3 % de chaux vive ont les mêmes effets que 4 % de chaux éteinte),

— la chaux vive est plus dense que la chaux éteinte.

Ces deux derniers avantages se traduisent notamment par une réduction des coûts du stockage et du transport.

Les critères d'efficacité de la chaux sont de deux catégories : granulométrique et chimique. Ils sont choisis pour faciliter la dispersion de la chaux dans le sol grâce à la granulométrie, et pour obtenir une réaction intense grâce à la granulométrie, à la réactivité et à la teneur en chaux libre.

Les critères indiqués dans le tableau concernent les chaux aériennes (vive ou éteinte). Leur respect garantit l'aptitude d'une chaux au traitement des sols fins ; cependant l'emploi d'une chaux ne remplissant pas toutes les conditions énumérées n'est pas nécessairement exclu, sous réserve d'une étude particulière de laboratoire, d'un calcul de rentabilité et de la compatibilité de la chaux en question avec le bon fonctionnement du matériel d'exécution.

Critères d'efficacité des chaux aériennes

CHAUX VIVE	CHAUX ETEINTE
Critères granulométriques	
1. Classe granulométrique 0/2 mm	
2. Passant au tamis de 200 μ > 90 %	
3. Passant au tamis de 80 μ > 50 %	Passant au tamis de 80 μ > 90 %
Critères chimiques et de réactivité	
1. Teneur en chaux libre > 80 % (*)	Teneur en chaux libre > 50 %
2. Teneur en chaux éteinte < 5 %	
3. Test de réactivité à l'eau (*) La température finale minimale doit atteindre 60 °C au bout de 25 mn.	

* Voir en annexe II, paragraphe 2 : description sommaire de quelques essais.

CHAPITRE 2

LES ÉTUDES

2.1 — ETUDE AU NIVEAU DE L'ENSEMBLE DU PROJET

Dans le cas de sols de mauvaises qualités, le projet doit être établi après une étude économique comparant entre elles les différentes solutions possibles : dépôt - emprunt, modification du tracé, traitement à la chaux ou autre type de traitement, etc. L'optimum économique peut d'ailleurs être une combinaison de différentes solutions.

Pour ce qui est du traitement à la chaux, le coût de la solution dépend du dosage qui sera effectivement utilisé. On peut cependant déterminer a priori le plafond de rentabilité de la solution, en se référant au coût de la technique concurrente la plus économique, et en calculant le pourcentage maximal moyen de chaux (d'une qualité et d'un prix (*), rendue sur chantier, donnés) admissible, au-dessous duquel le traitement reste compétitif. On peut ainsi avoir une idée de la latitude permise dans l'application de la solution traitement.

La détermination du dosage effectif prévisible ne peut se faire qu'à la suite de l'étude géotechnique qui doit s'attacher notamment à bien définir les diverses familles de sols susceptibles d'être rencontrées, et à suivre autant que possible pendant un cycle saisonnier complet l'évolution des teneurs en eau naturelles avec les précipitations correspondantes. On peut ainsi, en particulier, déterminer l'incidence de la période d'exécution prévisible du chantier sur le coût du traitement.

Il est aussi nécessaire de préparer le chantier de traitement, pour lui assurer un bon rendement et augmenter les chances d'une bonne exécution. Notamment si l'étude hydrologique en montre l'intérêt, il faut prévoir la construction d'un réseau d'assainissement préalable de l'emprise des terrassements, suffisamment tôt avant le début du chantier pour réduire les teneurs en eau naturelles.

Il faut prévoir également le réseau de drainage des eaux de ruissellement sur la plate-forme en cours de mise en œuvre et terminée, pour éviter l'accumulation d'eau sur le sol traité (particulièrement néfaste dans le cas où des cycles de gel-dégel se produisent).

2.2 — ETUDE EN LABORATOIRE

Le but de l'étude en laboratoire est de rechercher quels sont les dosages en chaux à prévoir en fonction de la chaux utilisée, de la nature et de l'état des sols visés par le traitement, et de l'utilisation soit en remblai, soit en couche de forme du matériau traité.

Cette étude doit comporter :

— **Le classement des différents sols en familles,** en donnant pour chacune d'elles les caractéristiques suivantes : courbe granulométrique jusqu'à 2 microns, limites d'Atterberg, courbe Proctor normal, courbe CBR obtenue par poinçonnement immédiat d'éprouvettes compactées à l'énergie de l'essai Proctor normal et fourchette annuelle des teneurs en eau naturelles.

— **L'identification de la chaux** — L'étude en laboratoire doit, dans toute la mesure du possible, être réalisée avec la (ou les) chaux qui sera utilisée sur le chantier.

L'identification de la chaux comporte la granulométrie par tamisage, la mesure de la teneur en chaux libre, la teneur en chaux vive (éventuellement) et le test de réactivité (pour les chaux vives).

---

* A cet égard, on peut considérer, dans l'état de la technique de traitement en 1972, que le coût est de 2 à à 3 F/m³ pour 1 % de chaux. Le coût des opérations de traitement (stockage, épandage, malaxage, compactage) est assez variable, notamment selon le volume traité et la qualité demandée : il se situe en général, dans les conditions actuelles, entre 2 et 4 F/m³.

— **L'étude du traitement proprement dit** — Cette étude doit être réalisée pour chaque famille de sols et pour chaque chaux, si plusieurs chaux de caractéristiques différentes sont en concurrence. Elle est conduite différemment suivant l'utilisation du matériau traité, en remblai ou en couche de forme.

Cas de l'utilisation en remblai

Le principe de l'étude consiste dans la recherche du dosage en chaux nécessaire pour que le sol traité, compacté à l'énergie de l'essai Proctor normal, atteigne un indice CBR (obtenu après **poinçonnement immédiat**) suffisant pour permettre une mise en œuvre dans de bonnes conditions.

La valeur de l'indice CBR à admettre sera en général comprise entre 5 et 15. Elle dépend des conditions de chantier et en particulier du matériel, du coefficient de sécurité dont on veut s'assurer vis-à-vis des aléas d'exécution, de la position de la couche traitée par rapport à la couche de forme et des caractéristiques des sols. Certains sols très collants peuvent nécessiter, en pratique, des dosages en chaux conduisant à des indices CBR relativement élevés pour atteindre une maniabilité suffisante (formation de grumeaux non collants).

Les résultats de cette étude permettent d'établir des abaques donnant en fonction de la teneur en eau naturelle du sol, ou de son indice CBR à cette teneur en eau naturelle (avant traitement), le pourcentage de chaux qu'il est nécessaire de lui incorporer pour obtenir un indice CBR donné.

Cas de l'utilisation en couche de forme

La qualité demandée peut, dans ce cas, également s'exprimer par un indice CBR, mais **déterminé après immersion.** L'indice CBR à retenir doit être choisi en fonction :

— des éléments qui permettent de définir les caractéristiques utiles d'une couche de forme : qualité globale prévisible du terrassement, qualité demandée par la chaussée et, notamment, la couche de fondation, sollicitations prévisibles de la couche de forme (eau, gel, trafic de chantier) ;

— du bilan épaisseur-qualité du matériau traité en fonction du dosage, ce qui fait notamment intervenir le compactage qui doit pouvoir être d'autant plus intense que le dosage est élevé (voir paragraphe 3.8).

L'étude en laboratoire a donc pour but de déterminer l'indice CBR après immersion, en fonction du dosage et de la teneur en eau initiale du matériau à traiter. Le domaine à explorer est limité, d'une part, par la valeur minimale de l'indice CBR à atteindre, par exemple 25 (*), et, d'autre part, par le dosage maximal compatible avec la rentabilité de la solution.

Pour la mesure de l'indice CBR, les éprouvettes seront en général compactées à l'énergie de l'essai Proctor normal, car l'expérience prouve que, dans la majorité des cas, les conditions de compactage sur chantier sont médiocres (portance du sous-sol, épaisseur de la couche, difficultés du compactage dans le cas des forts dosages) (**).

2.3 — PLANCHE D'ESSAIS

Il est souhaitable de réaliser, avant le chantier ou au début du chantier, une planche d'essais, notamment pour les chantiers importants. Le détail de son organisation est à prévoir soigneusement, de préférence avec le concours de l'entreprise (notamment pour le choix de l'emplacement, de l'étendue de la planche, du matériel et de l'enchaînement des essais).

Les objectifs des essais qui seront réalisés peuvent être les suivants :

— test en vue d'un réajustement éventuel des courbes de dosage en chaux mises au point au laboratoire, en fonction des conditions du chantier ;

— test des matériels proposés par l'entreprise, en vue de leur agrément et de leur étalonnage (épandage, malaxage, compactage) ;

— choix d'une méthode de mise en œuvre (notamment épaisseur des couches traitées en place avant et après transport s'il y a lieu) ;

— mise au point de l'organisation du contrôle pour la fabrication et la réception.

2.4 — APPROVISIONNEMENT EN CHAUX

La chaux pourra être fournie par l'entreprise ou par le maître d'œuvre.

Si le chantier de traitement doit durer plusieurs mois, et si les quantités de sol traité doivent être importantes, il sera bon de planifier l'approvisionnement en chaux, en relation avec les producteurs pour que ceux-ci puissent faire face à la demande sans heurts, et que les caractéristiques de la chaux puissent être suivies à la production.

* Les valeurs minimales de l'indice CBR à atteindre pourront sans doute être fixées ultérieurement d'une manière plus précise en fonction des éléments indiqués ci-dessus (qualité du terrassement, qualité demandée par la chaussée et sollicitations de la couche de forme). Une recherche est en cours sur ce point.

** Voir en annexe : le schéma de conduite d'une étude spécifique de traitement à la chaux

CHAPITRE 3

RECOMMANDATIONS SUR LA MISE EN ŒUVRE SPÉCIFICATIONS ET CONTROLES

3.1 — SECURITE

L'utilisation de la chaux vive exige que certaines dispositions et règles de sécurité soient suivies, notamment :

— nécessité que les transferts de chaux soient effectués par un personnel expérimenté ;

— éviter la pollution du voisinage, ce qui peut conduire à arrêter l'épandage quand il y a du vent ;

— exiger le port de gants, de masques, de lunettes, de cagoules ou l'usage de crèmes protectrices ;

— la pharmacie de chantier doit comporter des produits pour soigner les brûlures.

Remarque : L'épandage par sous-solage sera un facteur de sécurité important (voir paragraphe 3.5).

3.2 — ORGANISATION DU CHANTIER DANS LE CADRE DU MOUVEMENT DES TERRES

Dans le cas où le sol à mettre en œuvre doit subir un transport, le traitement sera de préférence effectué en place avant le transport vers le lieu de mise en œuvre.

3.3 — PREPARATION DU SOL

Le sol doit subir les préparations décrites au fascicule 2 du Cahier des prescriptions communes (CPC) et précisées au Cahier des prescriptions spéciales (CPS) « Terrassements généraux ».

On peut y adjoindre l'ensemble des travaux préliminaires ayant pour objet l'assainissement éventuel de la zone intéressée.

La surface du sol à traiter ne doit pas présenter trop d'irrégularités. En particulier, dans le cas d'une couche de forme traitée en place, la surface doit être nivelée suivant le profil définitif, pour assurer l'homogénéité de l'épaisseur de la couche traitée.

Il peut être nécessaire de procéder à une scarification préalable afin d'ameublir le sol et d'éliminer les gros éléments qui peuvent perturber le malaxage.

3.4 — APPROVISIONNEMENT, STOCKAGE ET CONTROLE DE LA QUALITE DE LA CHAUX

Il est souhaitable de contrôler la qualité de la chaux avant son départ de l'usine, pour ne pas avoir à la refuser une fois livrée sur le chantier. Ce contrôle peut être fait par un agent du laboratoire le plus proche de l'usine.

Les critères de contrôle à utiliser sont ceux retenus par le maître d'œuvre parmi les critères de choix mentionnés au paragraphe 1.2.

La capacité de stockage de la chaux sur le chantier doit être suffisante pour absorber les irrégularités d'approvisionnement qui peuvent se produire malgré les prévisions faites. Il paraît raisonnable de chercher à obtenir une capacité de stockage correspondant à deux jours de travail continu.

Le stockage doit être effectué à l'abri de l'air et de l'humidité. En cas de stockage de chaux dépassant 10 jours, des prélèvements seront faits pour mesurer la réactivité et la teneur en chaux libre.

3.5 — DOSAGE ET EPANDAGE DE LA CHAUX

Expression du dosage en chaux — En laboratoire, le dosage de la chaux est défini pondéralement ; il est rapporté au poids de sol sec et exprimé en pourcentage de ce dernier.

Sur le chantier, pour les opérations d'épandage, ce dosage est rapporté au mètre carré de sol ; pour obtenir le dosage en kg/m² à partir du dosage en pourcentage du poids de sol sec, il faut connaître la densité sèche en place du sol à traiter et la profondeur de malaxage qui sera atteinte.

Choix et ajustement du dosage en chaux — Au début et à chaque reprise de travail, un dosage initial est défini à partir de l'étude de laboratoire et de mesures, soit de teneur en eau naturelle, soit d'indice CBR du matériau non traité.

Cependant, ce dosage peut être sensiblement différent du dosage le plus économique à chaque instant, soit parce que le sol ou la chaux ne sont pas exactement ceux ayant servi à l'étude, soit parce que la teneur en eau naturelle évolue, soit enfin en raison des variations des conditions météorologiques et de leur influence sur l'évaporation au cours du malaxage et des autres manipulations pouvant précéder le compactage. Or il est important, économiquement, de toujours travailler au dosage minimal.

Il est donc utile de pouvoir ajuster le dosage, au moyen d'une étude sommaire analogue dans son principe à l'étude de laboratoire, ou en utilisant d'autres essais qui, sans déterminer le dosage, permettent de savoir si le dosage appliqué est trop fort ou trop faible. Parmi ces essais, qui sont effectués à partir du matériau déjà malaxé, on peut citer :

— mesure de l'indice CBR sur une éprouvette compactée à l'énergie de l'essai Proctor normal ;

— mesure du pourcentage de vides d'air sur une éprouvette compactée à l'énergie Proctor normal, cette mesure pouvant être effectuée commodément au moyen d'un picnomètre à air s'adaptant directement sur le moule Proctor. Le pourcentage de vides d'air est d'autant plus élevé que le dosage est fort (*) ;

— mesure de la perméabilité à l'air d'un échantillon compacté dans un moule.

Sur un chantier tant soi peu important les économies que l'on peut faire, en ajustant le dosage, peuvent justifier la présence continue d'un ou plusieurs laborantins.

A titre d'exemple, si pour 1 000 m^3 de sol traité, le contrôle et l'ajustement du dosage en chaux permettent une diminution moyenne de 0,1 point de chaux, le gain obtenu correspond au prix de revient d'une journée de laborantin. Ainsi pour un chantier de 2 000 m^3/j, une diminution du dosage réel de 1 % représente le prix de revient de 20 laborantins.

Enfin, il faut souligner qu'un excès de dosage n'est pratiquement pas décelable visuellement.

Epandage de la chaux — Compte tenu de la technologie actuelle des matériels (**), l'épandage est effectué par dépôt d'une couche de chaux à la surface du sol à traiter. Les précautions suivantes doivent être prises :

— faire attention à la discordance possible entre les largeurs de travail de l'épandeur et du malaxeur, ainsi qu'entre leurs débits respectifs ;

— arrêter l'épandage en cas de vent, pour éviter le transport éolien de la chaux qui peut fausser le dosage et mettre en danger la sécurité du personnel et des riverains, quand il s'agit de chaux vive.

> *Remarque :* La tendance actuelle est la recherche d'engins permettant la mise en place de la chaux au sein même de la couche à traiter. Ce mode d'épandage apporte un gain de sécurité, une amélioration des conditions de travail pour le personnel ainsi que la continuité de service par grand vent. Il a également l'avantage d'effectuer simultanément un ameublissement du sol.

Contrôles du dosage — Le contrôle de l'épandeur (étalonnage en début de chantier et contrôle en cours de fonctionnement) est effectué en recueillant la chaux répandue sur une plaque de 0,5 m^2 que l'on pèse ensuite;

il faut de plus contrôler la profondeur effective du malaxage dans le sol naturel. Ces deux éléments permettent de déterminer le dosage effectif.

Le contrôle du dosage effectif après malaxage peut éventuellement se faire en prélevant des échantillons de matériau traité sur lesquels on dose la chaux par pH-métrie (voir en annexe II).

3.6 — EPAISSEUR DES COUCHES AU MALAXAGE ET AU COMPACTAGE

Les conditions d'exécution imposent des limites à l'épaisseur des couches élémentaires soumises aux opérations succesives de malaxage et de compactage.

Les malaxeurs du type pulvi-mixeur, les plus puissants actuellement disponibles, permettent d'atteindre des épaisseurs de 40 cm environ dans le sol naturel. Cette épaisseur, qui correspond à 50-60 cm de sol foisonné, peut poser des problèmes de compactage en place.

Couche traitée et laissée en place — L'épaisseur maximale de la couche dépend de l'engin de malaxage et doit être compatible avec les possibilités des engins de compactage.

---

* Voir la description de ces essais en annexe II.

** Voir en annexe III

Couche traitée et transportée — L'épaisseur de malaxage est déterminée par les possibilités des malaxeurs et des engins de reprise.

La mise en place se fait par couches successives dont l'épaisseur est fonction des exigences et des moyens de compactage. On peut cependant imposer au CPS une limite supérieure.

3.7 — MALAXAGE

La qualité du malaxage dépend du matériel utilisé et de son mode d'emploi, ainsi que de la nature et de l'état du sol traité.

Les engins susceptibles d'être utilisés dans un atelier de malaxage sont des malaxeurs à rotor horizontal ou des charrues à disques. Leur emploi peut être combiné avec des passages de scarificateurs de divers types.

Une scarification préalable à la charrue, au ripper ou à la herse, avant, pendant ou après l'épandage de la chaux, permet d'augmenter le rendement et de réduire l'usure des malaxeurs à rotor. L'emploi d'un malaxeur à rotor est recommandé pour les couches de forme.

Le malaxage doit être fait assez rapidement après l'épandage de la chaux ; le délai dépend des conditions atmosphériques.

Il faut veiller à ce que deux bandes adjacentes soient effectivement jointives (sans bande de sol non traité entre elles) car le sol malaxé et foisonné déborde la limite réelle de malaxage.

La qualité du malaxage est appréciée d'abord par l'homogénéité de teinte du mélange, c'est-à-dire l'absence de traînées de chaux non incorporée dans le sol. Elle est appréciée d'autre part par la finesse de mouture du mélange, qui doit être en règle générale, de granularité 0/30 à 0/50 mm pour le remblai, et de 0/10 à 0/20 mm pour les couches de forme.

Le contrôle du malaxage porte sur les deux points ci-dessus ainsi que sur le délai écoulé entre l'épandage et le malaxage, notamment lorsque les conditions atmosphériques sont défavorables.

Si l'obtention de la granularité demandée se révèle difficile ou impossible par suite du caractère plastique et cohérent du sol, on peut envisager de procéder à un malaxage en deux étapes espacées dans le temps (par exemple 24 à 48 h), pour laisser à la chaux le temps d'ameublir les mottes argileuses. Dans ce cas, le sol doit être légèrement compacté après le premier malaxage, surtout s'il y a risque de précipitations.

3.8 — COMPACTAGE

La surveillance du compactage d'un sol traité à la chaux revêt une importance particulière pour les raisons suivantes :

— le comportement d'un sol fin traité à la chaux est tel que la densité sèche obtenue est très sensible à l'énergie de compactage, et cela d'autant plus que le dosage est élevé (cas des couches de forme) ;

— dans le cas où le dosage en chaux est faible, compte tenu de la teneur en eau naturelle (cas où l'on vise en remblais une valeur du CBR peu élevée, par exemple comprise entre 5 et 10), l'indice CBR décroît lorsque l'énergie de compactage dépasse une certaine valeur, cet effet étant dû à l'approche de la saturation (coussin de caoutchouc). En revanche, pour les dosages relativement forts, compte tenu de la teneur en eau naturelle (cas des couches de forme), l'indice CBR est fortement croissant en fonction de l'énergie de compactage ;

— le compactage des couches traitées, notamment lorsqu'il s'agit de couches de forme recouvrant un sol fin non traité, peut être rendu difficile, voire impossible, par le manque de portance du sol sous-jacent.

Ces différents facteurs rendent particulièrement intéressante l'exécution de planches d'essais qui peuvent permettre, en fonction des conditions du chantier, de définir l'épaisseur des couches à compacter et d'agréer le matériel de compactage et ses conditions d'emploi.

Tous les types d'engins adaptés aux sols fins conviennent en général.

Pour les couches de forme, il est nécessaire de disposer sur le chantier d'un engin permettant d'assurer la fermeture et le lissage de la surface.

Dans le cas de traitement à la chaux vive, il n'est pas souhaitable que le compactage suive de trop près le malaxage, afin que l'hydratation de la chaux ait le temps de se faire ; un délai de quelques heures est favorable quand les intempéries ne sont pas à craindre.

Contrôle dans le cas des remblais — Le compactage doit être, d'une part assez intense pour amener le matériau à une densité telle qu'il n'y ait pas de risques de tassement ultérieur et obtenir l'indice CBR visé (poinçonnement immédiat) et d'autre part assez modéré pour éviter la chute de l'indice CBR liée à la saturation.

Ces deux conditions doivent être satisfaites pour obtenir un bon résultat avec le dosage minimal.

Les mesures de densité peuvent permettre de vérifier que la première condition est satisfaite ; elles ne peuvent vérifier commodément que la seconde l'est, la chute de l'indice CBR étant très rapide pour une faible variation de densité.

Par conséquent, il est préférable de contrôler le compactage par une mesure plus significative, à la fois du point de vue de la densité et de la portance, telle que celle du pourcentage de vides d'air. Cette méthode permet d'autant mieux d'apprécier le résultat du compactage, que le dosage en chaux est correct, ce qui suppose que ce dosage a été ajusté et contrôlé par ailleurs (voir paragraphe 3.5).

Le pourcentage de vides d'air peut être mesuré directement et rapidement sur prélèvement intact, au moyen d'un picnomètre à air (*). On peut également le calculer à partir de mesures de densité en place et de teneur en eau, selon la formule.

$$n_a = 1 - w\,\gamma_d - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}$$

n_a pourcentage de vides d'air (rapport entre le volume d'air contenu dans un échantillon et le volume apparent de l'échantillon)

w teneur en eau pondérale

γ_d densité sèche

γ_s densité des grains solides.

Ce pourcentage de vide d'air doit être compris entre 3 et 12 %.

Contrôle dans le cas des couches de forme — Les couches de forme sont en général traitées à des dosages tels que l'indice CBR est toujours croissant à énergie de compactage et densité croissantes.

Le contrôle du compactage est alors effectué :

— soit par mesure de densité (gammadensimètre, densitomètre à membrane) : la densité sèche doit atteindre 100 % de la densité sèche Proctor normal ;

— soit par mesure du pourcentage de vides d'air, lequel doit être inférieur à 15 %.

> *Remarque :* l'auscultation de la plate-forme terminée est fréquemment prévue au moyen d'essais de plaques ou de mesures de déflexion. Ces mesures, bien que très utiles, ne sont pas envisagées dans le contexte de la présente recommandation, étant donné qu'elles ne rendent pas seulement compte de la qualité de l'exécution du traitement à la chaux.

3.9 — REGLAGE DES COUCHES ET DES SURFACES DE TALUS

Les spécifications prévues dans le CPS « Terrassements généraux » pour les sols fins non traités sont applicables.

Si la couche de forme passe l'hiver sans être recouverte, la partie supérieure risque d'être désorganisée par la conjugaison des effets de la pluie et des cycles de gel-dégel. L'ampleur des dégradations de surface dépend du compactage, de l'âge du sol traité et du dosage en chaux. Sa protection peut s'envisager de deux façons :

— par l'épandage d'un enduit imperméable qui joue également le rôle d'une couche de cure, dans le cas où la circulation de chantier sur la couche de forme est peu intense ; dans ce cas, le réglage est fait à la cote définitive ;

— en donnant à la couche de forme une légère surépaisseur (de 5 à 10 cm) qui sera supprimée par un réglage définitif avant la mise en œuvre de la chaussée.

Le réglage des couches de forme sera effectué par rabotage.

En cas de flache importante, le réglage par apport de matériaux peut être effectué, sous réserve de scarification préalable sur une épaisseur de 10 cm environ.

Le traitement à la chaux améliore les propriétés mécaniques des sols, ce qui peut permettre, dans certains cas, d'augmenter la pente des talus. Cet accroissement étant fonction du dosage en chaux et du comportement à long terme du mélange sol-chaux, une étude de laboratoire est nécessaire pour préciser les valeurs des pentes à adopter.

---

* Essai décrit en annexe II.

ANNEXE I

LES DIVERSES QUALITES DE CHAUX DISPONIBLES

Les chaux sont obtenues par calcination de calcaire et de calcaire argileux ou de marnes calcaires, et leurs propriétés sont différentes, notamment vis-à-vis des sols auxquels elles sont mélangées, selon le pourcentage de calcaire et la température à laquelle s'effectue la calcination.

PRODUITS DE DEPART	TEMPERATURE DE CUISSON		
	900 à 1 000 °C		1 000 à 1 200 °C
Calcaire pur % CO_3 Ca ⩾ 95	Chaux aérienne	grasse	
Calcaire + argile ou Calcaire marneux 90 < % CO_3 Ca < 95		maigre	Chaux faiblement hydraulique
Marnes calcaires 40 < % CO_3 Ca < 75			Chaux hydraulique Chaux éminemment hydraulique

PRESENTATION	Chaux vive ou hydratée	
PRISE	Ces chaux font prise à l'air par recarbonatation lente de la chaux	Ces chaux font prise dans l'eau par formation de silicates et d'aluminates de calcium hydratés, et à l'air par recarbonatation de la chaux libre qu'elles contiennent (au moins 10 %)

Certains calcaires contiennent une forte proportion de carbonate de magnésium, et donnent des chaux constituées d'un mélange en proportions variables de CaO et de MgO. Selon la teneur en magnésie (MgO) on les appelle : chaux calcique (% MgO < 2) — chaux calco-dolomitique (2 < % MgO < 25) — chaux dolomitique ou magnésienne (25 < % MgO < 45). Toutes ces chaux peuvent être vives ou éteintes.

Les chaux sont produites dans des fours qui sont verticaux (système ancien au charbon, ou moderne au fuel et au gaz), ou horizontaux rotatifs (système moderne au fuel ou au gaz).

A la sortie des fours, la chaux est formée de blocs solides qui sont broyés pour constituer de la chaux vive pulvérulente, ou hydratés pour constituer de la chaux éteinte qui devient pulvérulente par la réaction même.

Les chaux contiennent des impuretés sous forme « d'incuits » (carbonate de chaux) ou de « surcuits » (chaux vive fondue) qui peuvent être considérées comme chimiquement inertes pour les réactions qui nous intéressent.

La densité des chaux en vrac est la suivante :

- Chaux vive $0{,}88 < \gamma_d < 0{,}96$ $3{,}2 < \gamma_s < 3{,}4$
- Chaux hydratée $0{,}48 < \gamma_d < 0{,}64$ $2{,}3 < \gamma_s < 2{,}4$
- Chaux magnésienne hydratée $2{,}7 < \gamma_s < 2{,}9$

ANNEXE II

SCHEMA D'ETUDE EN LABORATOIRE

1 — ETUDE DU TRAITEMENT A LA CHAUX

Pour une chaux donnée et pour une famille de sol reconnue au cours des études de terrassement et susceptible d'être traitée à la chaux, la quantité de matériau nécessaire est de 100 kg environ. Le sol et la chaux seront identifiés selon les indications du paragraphe 2.2.

1.1 — Exécution des essais

Cas de l'utilisation en remblai

Les essais consistent en la mesure de l'indice CBR immédiat sur des éprouvettes préparées en général à trois ou quatre teneurs en eau initiales et à trois ou quatre teneurs en chaux (entre 0,5 et 4 % le plus souvent).

Les teneurs en eau initiales sont choisies après examen des courbes Proctor et CBR du matériau non traité et d'après la fourchette des teneurs en eau naturelles prévisibles au moment des travaux.

Il faut par ailleurs observer le plus grand soin au moment de l'humidification, de façon à préparer un matériau dont la teneur en eau ne s'écarte pas de ± 0,2 point de la teneur en eau visée. Une fois préparé, le matériau doit être conservé 24 heures au moins en boîte étanche.

Le malaxage du mélange sol-chaux sera effectué de préférence dans un appareil dont l'effet se rapproche de celui des malaxeurs de chantier, c'est-à-dire réalisant plutôt une fragmentation (par exemple au moyen d'une lame tournant à grande vitesse) qu'un pétrissage.

Après malaxage, le matériau est conservé environ une demi-heure en boîte fermée, puis compacté à l'énergie de l'essai Proctor normal.

Le poinçonnement CBR est effectué immédiatement après l'achèvement du compactage.

Cas de l'utilisation en couche de forme

Le schéma d'ensemble de l'étude est le même. Les dosages en chaux à retenir dépendent des caractéristiques demandées à la couche de forme (par exemple de 2, 4, 6 et 8 %).

Après malaxage, le mélange est conservé environ 2 heures en boîte fermée, puis compacté à l'énergie Proctor normal.

Les éprouvettes sont immergées durant quatre jours avant d'être poinçonnées.

1.2 — Présentation des résultats

Les résultats seront exprimés sous la forme d'un tableau récapitulatif et d'abaques (fig. 1 et 2) donnant en fonction de la teneur en eau naturelle du sol (ou de son indice CBR à cette teneur en eau naturelle) le pourcentage de chaux qu'il est nécessaire de lui incorporer pour obtenir l'indice CBR visé.

A titre d'exemple, pour le limon d'Orly de caractéristiques :

$$w_L = 32\ ,\ I_P = 12\ ,\ \gamma_{d(OPN)} = 1{,}79\ ,\ w_{(OPN)} = 16\ \%$$

et dans le cas où un CBR de 10 est visé pour une utilisation en remblai, les résultats peuvent se présenter comme sur la figure 2.

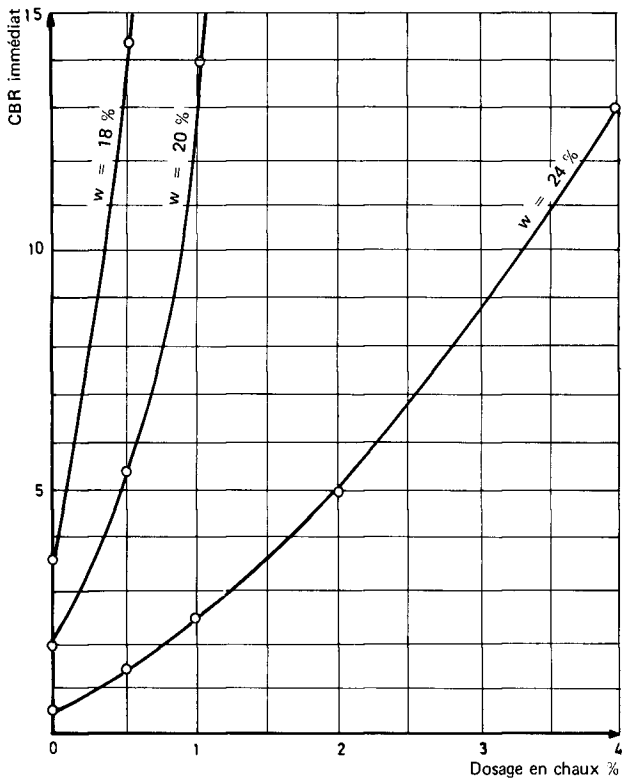
Ainsi pour une teneur en eau relevée sur chantier de 23 %, le dosage en chaux est de 2,5 %.

2 — DESCRIPTION SOMMAIRE DE QUELQUES ESSAIS

2.1 — Test de réactivité de la chaux

Le test de réactivité permet d'apprécier la rapidité de la réaction d'hydratation de CaO contenu dans une chaux vive commerciale donnée. Cette rapidité dépend notamment de la proportion de produits, non réactifs ou lentement réactifs à l'eau, contenue dans le produit commercial et de la granularité de ce dernier.

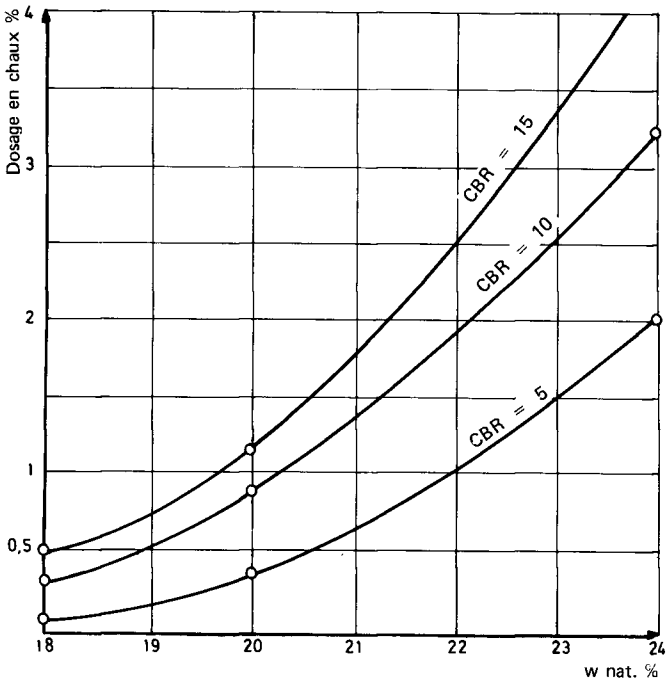
Fig. 1 - Exemple de présentation des résultats.



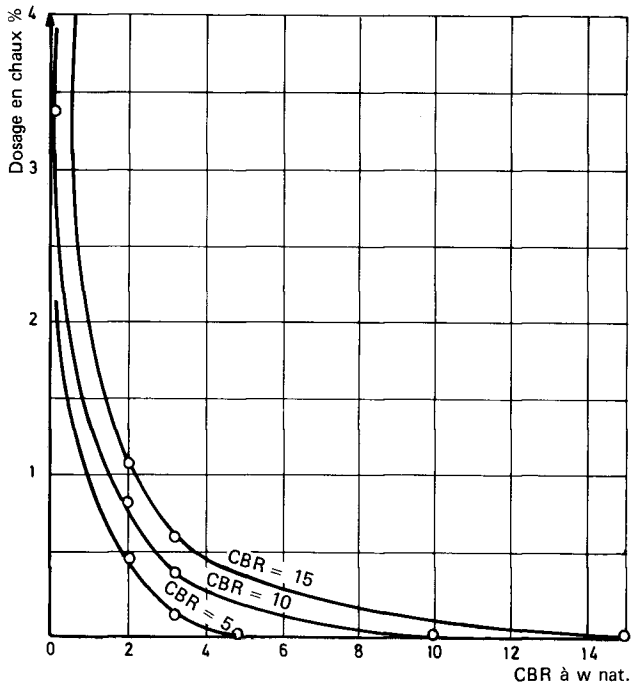
Variation de l'indice CBR immédiat en fonction du dosage en chaux et pour trois teneurs en eau initiales.

w% initial / % Chaux	18			20			24		
	CBR imm	w % traité	γd	CBR imm	w % traité	γd	CBR imm	w % traité	γd
0	3,5	18,1	1,73	2	19,7	1,67	0,5	24,1	1,56
0,5	14,5	17,6	1,73	5,5	19,6	1,69	1,5	23,7	1,57
1	23,5	17,1	1,70	14,0	19,3	1,69	2,5	23,1	1,59
2	35,5	16,4	1,67	23,5	18,7	1,68	5,0	21,7	1,63
4	27,0	14,7	1,57	23,5	17,4	1,61	13,0	20,5	1,63

Fig. 2 - Exemple d'abaques d'interprétation.



Dosages en chaux à prévoir en fonction de la teneur en eau naturelle pour obtenir un indice CBR immédiat de 5, 10, 15.



Dosage en chaux à prévoir en fonction de l'indice CBR à la teneur en eau naturelle, pour obtenir un indice CBR immédiat de 5, 10, 15.

Le test consiste à mesurer l'élévation de température produite par la chaleur dégagée par la réaction d'hydratation de CaO.

L'essai est réalisé dans un vase Dewar de 750 cm^3 environ, muni d'un couvercle hermétique et isolant conçu pour permettre le passage d'un thermomètre et d'un agitateur mécanique. Le thermomètre doit permettre des lectures jusqu'à 100 °C, avec une précision de ± 0,5 °C. L'agitateur, constitué d'une palette en matière non conductrice de la chaleur, doit avoir une vitesse de rotation de 300 tours par minute (± 50).

Les poids respectifs de chaux et d'eau seront pris dans le rapport 1/4 (par exemple 150 g de chaux pour 600 g d'eau). L'eau et la chaux utilisées doivent être à une température initiale de 20 °C (± 0,5).

L'eau est d'abord introduite dans le vase Dewar, puis on y verse rapidement la totalité de la chaux ; et dès cet instant, on mesure toutes les minutes la température du mélange jusqu'à stabilisation de cette température.

Les résultats sont présentés sur un graphique représentant l'évolution de la température en fonction du temps.

2.2 — Méthode provisoire de dosage de la chaux libre et de la chaux vive dans une chaux industrielle

Dans une chaux industrielle on distingue, d'une part, la *chaux combinée* sous forme de carbonates, silicates, aluminates, sulfates de calcium, etc., et, d'autre part, la *chaux libre* (ou chaux disponible) qui comprend la *chaux vive* à l'état de CaO et la *chaux éteinte* à l'état de $Ca(OH)_2$.

L'ensemble de la chaux libre et de la chaux combinée constitue la *chaux totale* contenue dans la chaux industrielle.

Le principe de la méthode consiste à doser :

— la chaux totale, au moyen d'une solution titrée d'acide chlorhydrique ;

— la chaux combinée sous forme de CO_3Ca, par dosage du CO_2 au moyen d'une solution d'acide phosphorique ;

— la chaux éteinte, par dosage de l'eau chimiquement liée à CaO au moyen d'une perte au feu.

Puis, par différences des résultats des dosages ci-dessus, exprimés en poids de CaO, on obtient les dosages en chaux libre et en chaux vive.

> *Remarque :* Cette méthode suppose que la chaux combinée est intégralement sous forme de CO_3Ca, ce qui est généralement le cas pour une chaux calcique grasse.

Les essais sont effectués de la manière suivante :

— Dosage de la chaux totale : on attaque 1 g de produit au moyen de 40 cm^3 d'une solution d'HCl ; l'acide chlorhydrique en excès est titré en retour par une solution normale de potasse, l'indicateur de virage étant la phénolphtaléine.

— Dosage de la chaux combinée : le produit à doser est attaqué par une solution de PO_4H_3 à 50 %, l'eau de solution étant remplacée par une solution saturée d'acétate de cuivre pour bloquer H_2S en cas de présence de sulfure. Le CO_2 dégagé est entraîné par un courant d'azote, desséché dans des absorbeurs à gel de silice et à perchlorate de magnésium, et recueilli dans un absorbeur à ascarite dont l'augmentation de poids donne le poids de CO_2 dégagé.

Cette opération n'est valable que pour les faibles teneurs en CO_2 : le poids de produit à prendre pour effectuer ce dosage doit être tel que la quantité de CO_2 dégagée n'excède pas 30 mg.

— Dosage de la chaux éteinte : on mesure le nouveau poids p' d'une prise initiale de poids p (2 grammes environ) qui, placée dans une capsule de platine tarée a été portée au four à 1 000 °C pendant 1 heure. La perte de poids p — p' est due au départ du CO_2 provenant de la décomposition des carbonates et de l'eau provenant de la déshydratation de la chaux éteinte.

— Calcul de la teneur en chaux libre et en chaux vive : la teneur en chaux libre, exprimée en pourcentage de CaO, est donnée par la formule

$$56\left(\frac{40-x}{20}-\frac{100\ z}{44\ y}\right)$$

avec x le nombre de cm^3 de KOH versés lors du dosage de la chaux totale

y et z respectivement le poids de la prise d'essai et l'augmentation de poids du tube absorbeur à ascarite lors du dosage de la chaux combinée ; la teneur en chaux vive est donnée par

$$\left[56\left(\frac{40-x}{20}-\frac{100\ z}{44\ y}\right)\right]-\left[\frac{56}{18}\left(\frac{100\ (p-p')}{p}-\frac{100\ z}{y}\right)\right]$$

2.3 — Dosage de la chaux incorporée dans un sol par pH-métrie

La méthode consiste à mettre sous forme de saccharate soluble le calcium contenu dans la chaux, par addition de saccharose, et à doser le saccharate formé en déterminant la quantité d'une solution d'acide borique nécessaire pour amener la solution à un pH de 10,5.

L'appareillage utilisé comprend essentiellement un pH-mètre et un dispositif d'agitation mécanique susceptible de réaliser un brassage assez énergique de 500 g de mélange sol-chaux mis en suspension dans deux litres d'une solution de saccharose à 10 %. Pour une chaux et un sol donnés, on établit préalablement la

courbe d'étalonnage fournissant en fonction du dosage en chaux commerciale la quantité de solution d'acide borique à 20 g/l, nécessaire pour porter le pH de la suspension à la valeur de 10,5.

Pour déterminer le dosage en chaux sur le chantier, il suffit d'effectuer un essai en se replaçant dans les conditions opératoires de l'étalonnage et de se reporter ensuite à la courbe d'étalonnage. Le dosage en chaux peut être connu vingt minutes environ après le prélèvement de l'échantillon de sol traité et il est possible de mener de front plusieurs essais (*).

2.4 — Mesure du pourcentage de vides d'air au picnomètre à air

Le pourcentage de vides d'air est, par définition, égal au rapport du volume des vides contenus dans un échantillon de sol au volume apparent de cet échantillon. Le principe de la méthode consiste à mesurer le volume des vides d'un échantillon de volume apparent connu.

Un échantillon de sol intact est prélevé à l'aide d'un carottier de volume connu, foncé dans le sol à l'aide d'un dispositif lui appliquant une pression statique croissante.

Après arasage, le carottier contenant l'échantillon est introduit dans la cuve de mesure d'un picnomètre à air spécialement adapté. Cet appareil donne directement le volume des vides de l'échantillon qui, rapporté au volume du carottier, fournit le pourcentage de vides d'air.

2.5 — Ajustement du dosage en chaux par la mesure de la perméabilité à l'air d'un échantillon de sol compacté dans des conditions déterminées

La perméabilité à l'air d'un sol varie dans de très larges limites suivant sa nature et son degré de saturation.

Pour les sols fins, la perméabilité à l'air d'un échantillon compacté d'une manière déterminée peut permettre de situer sa teneur en eau par rapport au domaine des teneurs en eau correspondant à de bonnes conditions de mise en œuvre : si le sol est trop sec, la perméabilité à l'air est très grande ; s'il est trop humide, elle est au contraire très faible ou pratiquement nulle.

Pour un sol traité à la chaux, la perméabilité à l'air est fonction non seulement de la teneur en eau naturelle, mais aussi du dosage en chaux : plus le dosage est élevé, plus la perméabilité à l'air est élevée, principalement en raison des modifications de structure (formation de grumeaux, etc.) qui résultent de l'addition de chaux.

En pratique, pour un type de sol donné, traité ou non traité, et pour des conditions d'essai déterminées, on peut définir une fourchette de perméabilité à l'air dans laquelle le sol doit se trouver pour être dans de bonnes conditions de mise en place. Et la mesure sur le chantier permet de vérifier rapidement si l'on se trouve dans la fourchette désirée.

Dans le cas des sols traités où les deux paramètres (teneur en eau et dosage en chaux) interviennent, l'essai permet de juger si le dosage en chaux est bien adapté à la teneur en eau naturelle, la fourchette de perméabilité à l'air dans laquelle il faut se trouver étant déterminée au cours de l'étude de laboratoire (si l'essai est envisagé).

Le sol traité est prélevé après malaxage et compacté dans un moule Proctor de façon reproductible au moyen d'un dispositif pneumatique constitué essentiellement d'une membrane élastique sur laquelle on applique durant quelques secondes une pression de 8 bars. L'échantillon, dans son moule, est ensuite soumis à l'essai de perméabilité à l'air. Le perméamètre utilisé comprend un réservoir de 15 litres environ que l'on gonfle à une pression de 0,5 bar et qui est relié par un tube souple à la cellule contenant l'échantillon.

La perméabilité à l'air est exprimée par le temps mis pour que la pression du réservoir chute de 0,5 à 0,2 bar. Avec un tel appareillage, l'essai de perméabilité s'effectue en cinq minutes environ.

---

* Bulletin de Liaison des Laboratoires Routiers des Ponts et Chaussées, n° 48, nov. 1970 : Dosage de la chaux par pH-métrie dans des matériaux traités.

ANNEXE III

INDICATIONS SOMMAIRES SUR LES MATERIELS DE TRAITEMENT EN PLACE

Il n'est pas question, dans cette annexe, des matériels d'utilisation courante dans les travaux de terrassements des sols fins (transport, régalage, compactage, etc.) mais uniquement des matériels spécifiques à l'exécution d'un traitement en place : stockage, épandage et malaxage.

Les indications données concernent les matériels existant actuellement. Les matériels et techniques d'épandage et de malaxage ont beaucoup évolué au cours des dernières années, ce qui a d'ailleurs bien contribué au développement des techniques de traitement en place ; cette évolution se poursuit.

1 — STOCKAGE

Le stockage de la chaux est effectué en silos ou en sacs (de préférence en plastique), pour de petits chantiers.

Il existe deux types de silos : les silos verticaux, du type couramment utilisé pour les centrales à béton, et les silos horizontaux présentant l'avantage de pouvoir se déplacer très fréquemment avec le chantier.

L'alimentation et la vidange des silos sont généralement effectuées par voie pneumatique. Leurs capacités courantes sont de 20 à 50 m³.

TABLEAU A

Caractéristiques des matériels d'épandage actuels

Type	Epandage en surface			Epandage par sous-solage (prototype en version tractée, version automotrice possible)
	Tracté ou porté		Automoteur	
	s'adapte à une citerne de transport	a sa propre cuve		
Capacité	selon la citerne 3 à 15 m³		3 à 5 m³	17 m³ (10 à 12 t de chaux)
Remplissage	pneumatique direct par la citerne	pneumatique — soit au silo, soit au camion citerne		
Engin de traction		tracteur agricole ou forestier ou bulldozer		bulldozer
Largeur	0,50 à 2,40 m	0,50 à 2,40 m	2 m environ	2,30 m
Vitesse de travail	15 à 60 m/mn			
Alimentation du système de dosage	gravité			fluidisation
Gamme de dosage	2 à 60 kg/m²			2 à 18 kg/m²
Dispersion	± 20 %			± 5 %
Mobilité tous terrains	celle de la citerne	peut être bien adapté aux mauvais terrains	bonne	

2 — EPANDAGE

Les caractéristiques des matériels d'épandage actuels sont résumées sur le tableau A. D'une manière générale, les observations suivantes peuvent être faites à leur sujet.

Réglage du dosage — Les systèmes doseurs des épandeurs sont volumétriques et les dosages pondéraux obtenus dépendent donc de la densité apparente de la chaux utilisée à son arrivée au système doseur ; aussi, le réglage initial des systèmes doseurs doit être contrôlé et ajusté à chaque changement de fourniture, ce qui est plus facilement réalisable lorsque le système doseur est commandé par un dispositif à variation continue. Ce dispositif est également indispensable si on veut ajuster finement le dosage en chaux en cours d'exécution.

Dispersion — Les épandeurs existants ont en général une grande dispersion ; actuellement une valeur de la dispersion de ± 20 % doit être considérée comme une limite maximale, admissible provisoirement. Il serait souhaitable que des progrès technologiques permettent de ramener assez rapidement la tolérance admissible à ± 5 % ce qui aurait une répercussion importante sur le développement de la technique du traitement des sols à la chaux.

Sous-solage et fluidisation de la chaux — La technique du répandage par sous-solage, conjuguée avec l'alimentation des doseurs en chaux fluidisée, expérimentée pour l'instant sur un engin prototype, est très prometteuse sous les aspects suivants : sécurité, précision du dosage, scarification préalable du sol.

3 — MALAXAGE

Les caractéristiques des matériels de malaxage actuels sont résumées sur le tableau B.

Le rendement des malaxeurs dépend de la mouture exigée et des conditions particulières du sol et du chantier. Des chantiers de terrassement en grande masse ont été réalisés avec des cadences de 2 000 à 2 500 m³/j (pour 10 heures de travail journalier), avec un malaxeur rotatif de grande puissance.

TABLEAU B

Caractéristiques des matériels de malaxage actuels

Matériels / Caractéristiques	Scarificateurs et charrues à disques		Malaxeurs rotatifs	
	Scarificateurs	Charrues à disques	Automoteurs	Tractés ou portés
Puissance de l'engin ou de son tracteur		100 à 300 ch	150 à 400 ch	15 à 100 ch (et 225 ch)
Poids		3 à 8 t	10 à 20 t	
Diamètre (rotor ou disques)		jusqu'à 1,25 m	jusqu'à 1,30 m	0,30 à 0,60 m (et 1,00 m)
Profondeur maximale d'action	jusqu'à 50 cm	20 à 45 cm	30 à 50 cm	15 à 25 cm (et 40 cm)
Largeur de travail		jusqu'à 3,30 m	1,80 à 3,10 m	1,30 à 2,50 m
Vitesse de travail			5 à 20 m/mn	5 à 20 m/mn